



**Pro gradu -tutkielma:**

**Kierrätysviskoosi paperin raaka-aineena:  
käyttöpotentiaali ja vaikutukset paperin ominaisuuksiin**

Katja Stolt

Maisterintutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Puuteknologia

Marraskuu 2020

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä – Författare – Author Stolt, Katja			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Kierrätysviskoosi paperin raaka-aineena: käyttöpotentiaali ja vaikutukset paperin ominaisuuksiin			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Puuteknologia			
Työn laji – Arbetets art – Level Maisterin tutkielma	Aika – Datum – Month and year Marraskuu 2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 41	
<p>Tiivistelmä – Referat – Abstract</p> <p>Lisääntyvä tekstiilijätteen määrä, tekstiilien tarve, sekä selluloosapohjaisten tekstiilien määrän lisääntyminen tulevaisuudessa, johtivat tämän tutkielman tavoitteisiin. Tavoitteena on selvittää millä tavoin kierrätysviskoosista valmistettu massa vaikuttaa laboratorio-oloissa valmistettavan paperin ominaisuuksiin. Massaa käytetään tutkimuksessa erilaisilla seos -suhteilla koivusellun kanssa. Ääripäinä ovat molempien, sekä koivusellun, että viskoosin 100 prosenttiset osuudet. Tutkimukseen kuuluu massojen valmistus, paperiarkkien valmistus ja mittaus. Erilaisia koepisteitä on viisi ja valmistettavia testiarkkeja valmistettiin 12 kappaletta jokaista koepistettä kohden, yhteensä 60 kappaletta. Massan ja arkkien valmistuksessa käytetään yleisiä paperinvalmistuksessa käytettyjä standardeja. Tavoitteena oli tehdä arkkeja, joiden tavoitekuivapaino on 1,63 g ja neliöpaino 60 g/m<sup>2</sup>. Mittaustuloksissa ilmoitetaan mittauksien sekä laskelmien koepisteittäiset keskiarvot, vaihteluvälit ja hajonnat.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen perusteella kierrätysviskoosin kuidun käyttäminen paperin valmistukseen ei täytä paperin vaatimuksia valitulla paperinvalmistusmenetelmällä. Massan tiheyden lisääminen kuitenkin antaa viitteitä siitä, että paperia pystyy valmistamaan ja käyttämään. Viskoosille ja muille selluloosapohjaisille tekstiilikuiduille löytyy uusia käyttömahdollisuuksia. Todennäköisesti tekstiilit tullaan enimmäkseen kehräämään uudestaan langaksi. Vaihtoehtoiset käyttökohteet kierrätyskuidulle tulevat todennäköisesti ajankohtaiseksi, kun kuitua on jo kierrätetty useamman kerran.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Viskoosi, kierrätys, paperin valmistaminen			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Juha Rikala			
Säilytyspaikka – Förvaringsställe – Where deposited HELDA - Helsingin yliopiston digitaalinen arkisto / HELDA			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

# **Sisällys**

<b>Käsitteet</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
1.1 Viskoosi	6
1.2 Paperin ominaisuudet	11
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	14
<b>2 Aineisto ja menetelmät</b>	<b>15</b>
2.1 Massojen valmistus	16
2.2 Laboratorioarkkien valmistus	17
2.3 Testikappaleiden valmistus ja mittaus	21
2.1.1 Neliömassa	22
2.1.2 Paperin paksuus	23
2.1.3 Karheus	24
2.1.4 ISO-vaaleus, opasiteetti ja valonsirontakerroin	25
2.1.5 Repäisyjuuuden mittaus	26
<b>3 Kokeellisen osuuden tulokset ja tuloksien tarkastelu</b>	<b>26</b>
<b>4 Johtopäätökset</b>	<b>33</b>
<b>5 Lähteet</b>	<b>35</b>
<b>6 Liitteet</b>	<b>37</b>

## Käsitteet

Kierrätys = materiaalin käyttämistä hyödyksi uudessa yhteydessä uusien tuotteiden valmistuksessa

Liukosellu = Liukosellun valmistus alkaa kuoritun puun haketuksella. Liukosellusta liuotetaan hemiselluloosa, puun sokerit, pois ennen keittoa. Puuta keitetään kemikaaleissa, pestään, valkaistaan ja kuivataan. Lopputuotteena syntyy puhdasta selluloosaa.

Paperin optiset ominaisuudet = ISO-vaaleus (%), opasiteetti (%) sekä valonsirontakerroin ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ) (Aaltonen 1986)

Paperin perusominaisuudet = neliömassa ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), sileys/karheus ( $\text{ml}/\text{min}$ ) sekä ilmanläpäisevyys ( $\text{ml}/\text{min}$ ) (Aaltonen 1986)

Repäisylujuus = Paperin mekaaninen ominaisuus, repimiseen tarvittava voima (Aaltonen 1986)

Uudelleenkuudutus = materiaalin hajottaminen uudeksi massaksi

Viskoosi = tekstiileissä käytetty muuntokuitu, joka valmistetaan sulfiittiselluloosasta. Selluloosan raaka-aineena käytetään tavallisesti koivua tai kuusta, mutta myös pyökkiä, eukalyptuspuuta, kaislaa tai bambua.

# 1 Johdanto

Selluloosapohjaisten tekstiilikuitujen käyttö tekstiiliteollisuudessa yleistyy merkittävästi maailman väkiluvun ja elintason kasvaessa. Näin ollen myös tekstiilikuidun tuotannon tarve kasvaa. Selluloosapohjaisia tekstiilikuituja kehitellään jatkuvasti eri tahoilla ja erilaisilla tekniikoilla. Nämä tekstiilikuidut ovat kestävästi valmistettuja vaihtoehtoja mm. ympäristöä kuormittavalle puuvillalle. Puuvilla vaatii runsaasti tilaa, vettä, torjunta-aineita ja lannoitteita. Puu tekstiilikuidun lähteenä ei vaadi kastelua ja kasvaa ”itsestään”. Nykyinen puuvillan tuotanto ei myöskään enää pysty vastaamaan kysyntään.

Suomalaiselta metsähehtaarilta on arvioitu saatavan noin 500 kiloa viskoosia (Boncamper 2011). Verrattaessa viskoosia ja puuvillaa tekstiilikuidun valmistamisessa nähdään, että puuvilla vaatii paljon vettä. Esimerkiksi jos kilo viskoosikuitua valmistetaan puuvillasta, valmistukseen kuluu yli 11 000 litraa vettä. Puukuiduista valmistettuun viskoosikiloon tarvitaan puolestaan 450 litraa vettä. Puuvillan kasvualustoja, pelloja, tarvittaisiin puuvillan kasvatusmaissa välttämättä ruoan tuotantoon, sillä viljelykelpoinen maa-ala vähenee ja ruoan tarve kasvaa. Puusto taas kasvaa Suomessa vuositason miljoonilla kuutioilla enemmän kuin sitä käytetään. Jos tämä ”hakkuusäästö” käytettäisiin mm. puuvillaa korvaavaan liukosellun tuotantoon, puuvillan tuotannosta vapautuvilla pelloilla voitaisiin viljellä elintarvikkeet miljoonille ihmisille. (Biotalous: Liukosellu 2014)

Tekstiiliteollisuus on yksi saastuttavimpia teollisuudenaloja maailmassa. Tekstiilit ovat välttämättömiä, joten niitä tulisi valmistaa vastuullisesti ja kestävästi. Käytännössä näin voidaan tehdä käyttämällä talteen otettuja ja uusiutuvia materiaaleja ja hyödyntäen ympäristöystävällisiä prosesseja. Sertifioiduista metsistä saatava selluloosa on määrällisesti suurin saatavilla oleva raaka-aine, joka ei uhkaa vesivaroja tai ruoan tuotantoketjuja. (VTT: Vastuulliset tekstiilit)

Viskoosin käyttö hygieniatuotteissa on myös kasvussa sen ominaisuuksien vuoksi. Viskoosivaatteiden ja muiden selluloosapohjaisten tekstiilien määrän lisääntyessä tulevaisuudessa lisääntyy näin ollen myös tekstiilijäte. Tuotanto tekstiiliteollisuudessa on huomattavaa: maailmanlaajuisesti vuositason tuotetaan 150 miljardia vaatetta (Open ilmasto-opas 2020). Tekstiilijätteen määrä on kasvanut 2000-luvulla ja on vuosittain Suomessa 16,8 kiloa henkilöä kohti (Motiva: Tekstiilit 2018). Valtaosa käytetyistä poistovaatetekstiileistä päättyy energiakäyttöön. Polttamisen sijaan tekstiilijätteen voisi hyödyntää uusiokäyttöön uusiomateriaaliksi, jolloin neitsytraaka-aineen tuotantotarve vähenee. Tämä vähentäisi myös

ympäristökuormitusta. Kierrätyksen tehostaminen loisi myös mahdollisuuksia uusille toimijoille liikemaailmassa. Kierrätettävien tekstiilien osuus on tällä hetkellä matala, vain 1,5 prosenttia. Tekstiilien kierrätyksen osuus kasvaisi, jos esimerkiksi rikkiäisille tekstiileille olisi oma kierrätyspisteensä. (Ympäristö.fi 2015) Suomessa vaatetekstiilien sijoittaminen kaatopaikalle on ollut kiellettyä vuoden 2016 alusta alkaen. Epäselvää on vielä, kuinka tekstiilien keräys, lajittelu ja uudelleenkäyttö tullaan toteuttamaan. Poistotekstiilien keräyksen odotetaan käynnistyvän lähivuosina. Kierrätyksen puute on johtunut tekstiilin käsittelymenetelmien puutteesta. (Rosk'n Roll 2020)

Tekstiilijätteen kasvavan määrän vuoksi olen valinnut pro graduni aiheeksi viskoosikuidun ja sen kierrättämisen mahdollisuudet paperin muodossa. Tutkin, miten kierrätysviskoosi vaikuttaa laboratorio-oloissa valmistetun paperin ominaisuuksiin seosaineena ja sitä, onko mahdollista tehdä paperia 100 % viskoosimassasta. Tähän olen käyttänyt materiaalina valmista valkoista viskoosikangasta, joka kuidutettiin mekaanisesti sopivaksi testimateriaaliksi.

## 1.1 Viskoosi

Englantilainen luonnontutkija ja tiedemies Robert Hook mainitsee kirjassaan *Micrographia* tekokuidun valmistusmahdollisuuksista jo vuonna 1664 (Boncamper 2011). Hook käyttää seuraavia sanoja: ”Olen usein ajatellut, eikö olisi mahdollista valmistaa keinotekoista, liimamaista ainetta, joka olisi samantapaista - ehkä ei aina yhtä hyvää tai mahdollisesti jotain parempaakin - kuin se erite tai mitä se sitten lieneekin, josta silkkiäistoukka kehrää kotelokoppansa. Jos sellainen aine löydettäisiin, olisi varmaan yksinkertaista kehittää sopivia keinoja vetää siitä hienoja, käyttökelpoisia säikeitä. Minun tuskin tarvitsee mainita sellaisen keksinnön arvoa eikä myöskään niitä etuja, jotka siitä keksijälle koituisivat, molemmat ovat ilmiselviä.” (Sundqvist 1986) Kemisteillä oli jo kauan ollut tiedossa, että luonnossa on tekstiilikuitumolekyylien kaltaisia molekyylejä. Erityisesti etsittiin juuri selluloosan liuotusmenetelmiä. Menestyksekkäimmiksi muodostuivat englantilaisten kemistien C.F Crossin ja E.J. Bevanin tutkimukset, jotka johtivat vuonna 1892 nykyisen viskoosimenetelmän kehittämiseen. Viskoosimenetelmän viimeistelijänä vuonna 1898 oli englantilainen C.H. Stern. (Boncamper 2011) Teollinen tuotanto käynnistyi hitaasti ja varsinainen läpimurto tehtiin vasta 1930-luvulla (Viskoosikuidut, Raportti 7). Viskoosia on kutsuttu myös nimillä säteri, silla ja raion. Aivan 1900-luvun lopulla kyseisen menetelmän rinnalle onnistuttiin kehittämään uusi valmistusmenetelmä, jolla saatiin lyocell-kuitua (Boncamper 2011).

Viskoosi on EU:n direktiivin mukaan viskoosimenetelmällä valmistettu selluloosamuuntokuitu filamentti- ja katkokuidun muodossa. Kemiallisesti viskoosi on selluloosaa ja selluloosa on eniten tekstiilitarkoituksiin käytetty luonnon valmistama molekyyli. (Boncamper 2011) Jo pitkään valmistettu selluloosapohjainen muuntokuitu, viskoosi, valmistetaan liukosellusta. Viskoosikuidusta kehrätään lankaa, josta kudotaan kangasta tai neulosta vaatteisiin ja sisustukseen. Puolet tuotetusta viskoosista käytetään vaate- ja sisustustekstiilitarkoituksiin.

Sopiakseen tekstiilikuidun molekyyliksi tulee luonnossa tavatun molekyylin olla riittävän pitkä ja haarautumaton. Käyttöönoton kustannukset tulisivat olla myös kohtuullisia. Viskoosin valmistajat käyttävät raaka-aineenaan liukosellua, joka sisältää paljon selluloosaa ja vain hieman hemiselluloosaa sekä ligniiniä. Selluloosapitoisuuden tulee viskoosin raaka-aineessa olla vähintään 90 %. Viskoosiprosessissa lyhytkuituinen selluloosa muunnetaan kehrättäväksi liuokseksi, jonka jälkeen selluloosa muunnetaan pitkäkuituiseksi (Halme 2017). Viskoosin raaka-aineeksi sopivat Suomessa käytetyt koivu ja kuusi sekä pitkiä selluloosamolekyyliä sisältävät bambu, pyökki, eukalyptus ja kaisla. Raaka-aine toimitetaan puunjalostustehtailta viskoosin valmistajille lähes puhtaana selluna ja valkaistuina selluloosa-arkkeina. (Boncamper 2011)

Boncamper kuvaa viskoosiprosessin seitsemän eri vaihetta.

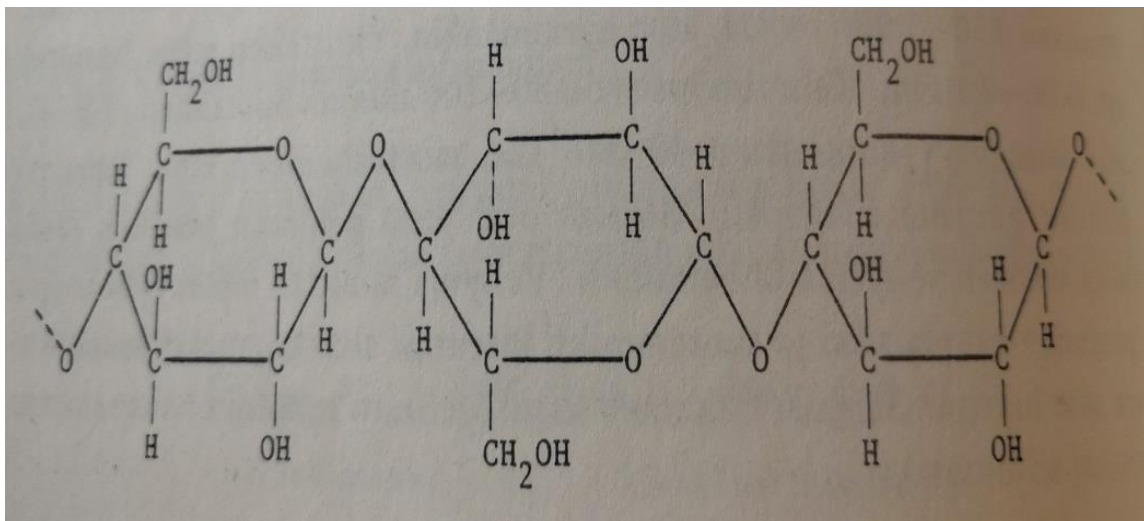
- Merseroinnissa raaka-aine revitään ja käsitellään 18-prosenttisella natriumhydroksidiliuoksella (NaOH), jonka seurauksena syntyy alkaliselluloosaa.
- Esikypsytyksessä alkaliselluloosan annetaan reagoida ilman hapen kanssa, mikä aiheuttaa selluloosamolekyylien katkeamisen. Tarkoituksena on saada puhdas ja molekyylikooltaan tasa-aineinen massa.
- Rikityksessä esikypsytettyyn alkaliselluloosaan johdetaan rikkihiiltä (CS<sub>2</sub>). Tämän seurauksena muodostuu selluloosaksantaattia. Talteen otettu rikkihiili voidaan palauttaa uudelleen prosessiin, jolloin raaka-ainekustannukset vähenevät (Halme 2017).
- Selluloosaksantaatti liuotetaan laimeaan kaksiprosenttiseen NaOH-liuokseen ja näin syntyy oranssinväristä viskoosia.
- Jälkikypsytyksessä viskoosin annetaan seistä huoneenlämmössä, mikä vaikuttaa viskoosin kehrättävyyden paranemiseen.
- Jälkikypsytyksen aikana poistetaan epäpuhtaudet suodattamalla viskoosia kaksi/ kolme kertaa. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa allergioita (puhdas selluloosa ei aiheuta allergioita) ja alentaa kuidun ominaisuuksista esimerkiksi lujuutta, kestävyyttä tai

mittapysyvyyttä. Onkaloiden muodostuminen kehrättyyn kuituun estetään ilmanpoistolla, joka tehdään viimeisen suodatuksen yhteydessä. (Boncamper 2011) Korkea lämpötila aiheuttaa veden höyrystymisen, jolloin ilma- ja kaasukuplat poistuvat höyryn mukana (Viskoosikuidut, Raportti 7).

- Viskoosi pumpataan tasaisesti kehrusuulakkeitten läpi kehruukylpyyn. Kehruukylvyssä tapahtuu kemiallinen reaktio kehruuliemen ja viskoosin välillä. Liuos sisältää vettä, rikkihappoa ( $H_2SO_4$ ) ja sinkkisulfaattia ( $ZnSO_4$ ). Nestesäikeet hyytyvät kuiduiksi. Suulakkeen halkaisijan koko valitaan käyttötarkoituksen mukaan.

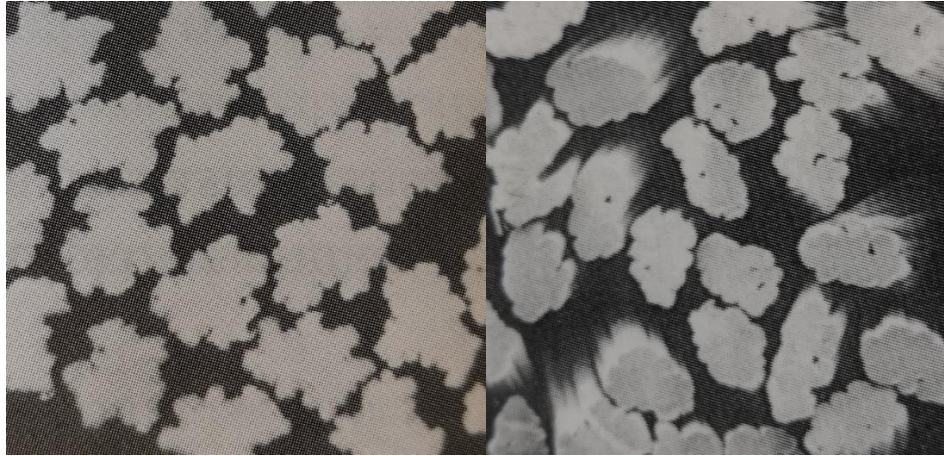
Syntyneet kuidut puhdistetaan, viimeistellään ja saatetaan lopuksi kauppamuotoonsa.

Viskoosin molekyyliketjut (Kuva 1) ovat lyhempiä kuin luonnon selluloosakuiduilla (Jokelainen 1984), mikä vaikuttaa tekstiilin ominaisuksiin. Viskoosin poikkileikkauskuva on yleensä piparkakkumainen (Kuva 2) ja pinnasta löytyy pituussuuntaisia juovia (Kuva 3). Muodostuneessa viskoosikuidussa on pieni kuorikerros, joka johtuu uloimpien kerroksien nopeammasta hyytymisestä. Kuidun alkuperää ei voi päätellä kuidun ulkoisesta ominaisuudesta. (Boncamper 2011)

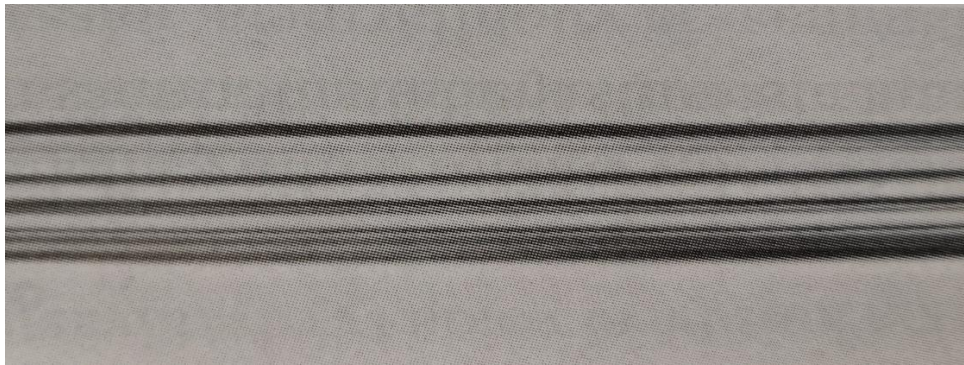


**Kuva 1.** Viskoosin molekyyli rakenne (Jokelainen 1984).





**Kuva 2.** Piparkakkumainen viskoosi (Boncamper 2011).



**Kuva 3.** Viskoosin pinnasta löytyy pituussuuntaisia juovia (Boncamper 2011).

Viskoosikuidun valmistusprosessit ovat puhdistuneet ja ympäristö otetaan huomioon. Prosessissa käytettyä vettä kierrätetään ja prosessissa käytettyjä kemiallisia aineita otetaan talteen niiden hyödyntämiseksi uudelleen viskoosin valmistusprosessissa tai jonkin muun tuotteen raaka-aineena. Viskoosia valmistetaan eri puolilla maailmaa useilla eri prosesseilla, mutta käytetyt kemialliset reaktiot ovat samoja. (Vihreä lanka 2015) Viskoosi on monipuolinen kuitu, sillä selluloosan ominaisuudet mahdollistavat sen rakenteellisen ja kemiallisen muokkauksen. Kuitu luokitellaan pituuden mukaan filamenttikuituihin (jatkuviin) tai katkokuituihin sen tulevan käyttötarkoituksen mukaan. Tekstiiliteollisuuteen, vanuteollisuuteen, saniteettikuiduille, nonwoven teollisuuteen, mattokuituihin sekä erityistä lujuutta vaativille kuiduille on muodostettu omat laatukriteerit. Viskoosin valmistusprosessissa jokaisessa vaiheessa on sen ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä, kuten erilainen toimintatapa, aika, nopeus, määrä tai lämpötila. Viskoosin tuotannossa on arviolta yli 60 erilaista tekijää, jotka määrittävät, millainen kuidusta tulee rakenteeltaan ja ominaisuuksiltaan. (Boncamper 2011)

Jälkikäsittelyillä kehruuprosessin aikana voidaan muuttaa viskoosin ominaisuuksia esimerkiksi värjäämällä, himmentämällä (viskoosilla on lasimainen kiilto), valmistamalla ontto sisusontelo, kihartamalla tai luomalla palosuojaus. Voidaan myös valmistaa vettä hylkivää tai erityistä imukykyä vaativaa viskoosia. (Boncamper 2011) Pienet lujuudet ovat ominaista viskoosille, mutta laadun kannalta on tärkeää saavuttaa mahdollisimman korkea lujuus (Halme 2017). Mahdollisimman suuren lujuuden saavuttamiseksi vastamuodostunutta kuitua pyritään oikomaan molekyyliketjuja venyttämällä ja nopealla jäähdytyksellä. Tässä voidaan käyttää myös kuumavenytystä. Viskoosista valmistetaan myös erikoislujia kuituja, joita käytetään mm. renkaissa, kuljetushihnoissa ja paloletkuissa. (Boncamper 2011)

Sekoitekuituna viskoosikuitu pyritään tekemään pituudeltaan sekoitettavaa kuitua vastaavaksi. Sekoitteena (Kuva 4) käytön tarkoituksena on saada esille viskoosin hyvät ominaisuudet, kuten esimerkiksi kiilto, kuitujen tasaisuus, väri, lujuus, imukyky, pehmeys tai pieni staattisuus. Viskoosi imee kosteutta ja tämän vuoksi tukee kehon lämmönsäätelytoimintaa. Hyvän kosteudenpidätuskykynsä vuoksi viskoosia käytetään yhä enemmän hygieniatuotteissa. (Boncamper 2011) Suurimpia selluloosamuuntokuitujen valmistajia tällä hetkellä ovat Kiina, Yhdysvallat, Intia, Indonesia ja Japani (Vihreä lanka 2015). Kiinassa käytetään myös uutta Suomessa kehitettyä PPV-teknologiaa (suomalaislisenssi), joka mahdollistaa viskoosikuidun valmistamisen 100-prosenttisesta paperisellusta. Teknologia tarjoaa viskoosikuidun valmistajalle merkittävän kilpailuedun, koska paperisellu on raaka-aineena liukosellua halvempaa. Myös kuidun ominaisuudet paranevat. (Tekniikka & Talous 2012)



**Kuva 4.** Mekko tuntuu pehmeältä, hengittää ja pitää hyvin muotonsa myös normaalissa 40 asteen pesussa. 67 % Bambuviskoosi, 28 % Luomupuuvilla, 5 % Elastaani. (<http://hameentie12.blogspot.fi/2013/07/hyva-paha-viskoosi.html>).

## 1.2 Paperin ominaisuudet

Hägglom-Ahnger ja Komulainen (Paperin ja kartongin valmistus) kuvaavat paperia ja paperista mitattavia ominaisuuksia. Paperi on rakenteeltaan ohut, levymainen kuitutuote. Paperia valmistetaan kemiallisesta, mekaanisesta, kemimekaanisesta sekä uusiomassasta. Tärkeimpiä ominaisuuksia paperille ovat tasainen kuitujakauma, sopiva kuitujen suuntautuminen ja riittävät kuitusidokset. Paperin optisista ominaisuuksista tärkeimmät ovat kiilto, opasiteetti ja vaaleus. Painopaperin tärkeimmät ominaisuudet puolestaan ovat painojäljen laatu ja ajettavuus.

Neliömassalla tarkoitetaan paperin massaa grammoina laskettuna neliömetriä kohti ( $\text{g/m}^2$ ). Neliömassaan sisältyy sekä paperin kuiva-aine että vesi. Paperien neliömassat vaihtelevat normaalisti välillä 28–150  $\text{g/m}^2$ . Paperin lujuudet, opasiteetti ja tiiviys paranevat neliömassan kasvaessa. Neliömassan vaihtelu aiheuttaa paperin ominaisuuksissa vaihtelua, joka saattaa vaikeuttaa merkittävästi paperin käsittelyä jälkikäsittely- ja jalostusprosesseissa sekä huonontaa valmiin paperin käyttöominaisuuksia. Paperin neliömassan kasvaessa muun muassa vetolujuus

kasvaa. Vetolujuus kuvaa paperin venymäkäyttäytymistä, mitä ei ole tässä tutkimuksessa mitattu.

Neliömassan lisäksi kosteus vaikuttaa lähes kaikkiin paperin ominaisuuksiin. Veden poistuessa rainassa syntyy yhä uusia suoria vetysidoksia kuitujen välille ja näin paperin vetojäykkyys, vetolujuus ja taivutusjäykkyys kasvavat. Paperin venymä pienenee kuiva- aineen kasvaessa.

Paksuuden merkitys paino- ja kirjoituspapereille ei ole kovin suuri. Sitä voidaan mitata käyttämällä ns. pinopaksuutta, jossa mitataan usean arkin summapaksuus ja jaetaan se arkkien lukumäärällä.

Paperi on yleensä sitä tiheämpää, mitä enemmän se sisältää täyteaineita ja päällystettä. Tiheys on rakenteellinen ominaisuus, joka voidaan laskea paksuudesta ja neliömassasta. Tiheys on neliömassa jaettuna paksuudella ja sen perusyksikkö on  $\text{kg/m}^3$ .

Paperien pintarakenteesta puhuttaessa tarkoitetaan lähinnä pinnan karheutta, joka vaikuttaa paperin painettavuuteen, painon laatuun. Yleisin mittausmenetelmä on tasaisen metallipinnan ja paperin pinnan välistä virtaavan ilman mittaamiseen perustuvat menetelmät. Sileys sekä karheus ilmoitetaan mittayksiköllä  $\text{ml/min}$ .

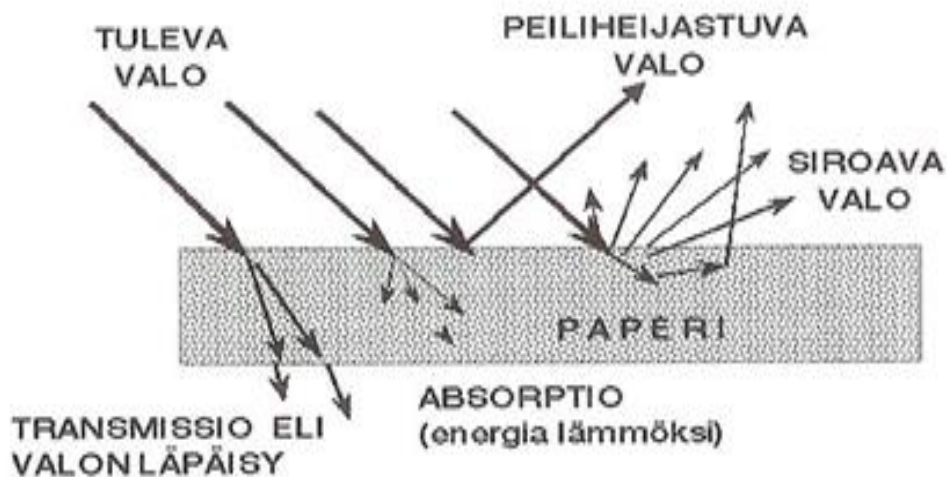
Paperi koostuu pääosin kuitumateriaalista, joka muodostaa verkoston kuitujen välisillä sidoksilla. Kuitujen väliset tilat vuorostaan muodostavat huokosverkoston. Paperin ilmanläpäisykyky, liimauksen kestävyys, rasvanpitävyys sekä päällysteen ja painovärin tunkeutuminen riippuvat ratkaisevasti huokoisuudesta ja huokoskoon jakautumisesta. Jauhatuksen lisääminen pienentää huokosten kokoa ja mahdollisesti myös niiden määrää. Kokoonpuristaminen vuorostaan pienentää huokostilan tilavuutta, mutta ei välttämättä huokosten määrää.

Nesteiden tunkeutumista paperiin voidaan ennustaa ilmanläpäisevyyden ( $\text{ml/min}$ ) avulla. Erityisesti painovärin tunkeutuminen päällystämättömien paperien sisään ja läpi korreloi ilmanläpäisevyyden kanssa. Koska paperi muodostuu pääasiassa kuiduista, on ilmanläpäisevyydellä ja huokoisuudella selvä yhteys. Ilmanläpäisyn alentaminen parantaa yleensä painettavuusominaisuuksia (esimerkiksi täyttämällä huokokset päällysteellä). Nesteiden läpäisyominaisuuksiin vaikuttavat paperin huokoisuuden ja tiiviiden lisäksi huokosrakenteen tyyppi ja ko. ominaisuuksien muuttuminen eri aineiden vaikutuksesta. Nesteen tunkeutumisnopeus kasvaa, kun huokokset ovat isoja, pintajännitys kasvaa ja kosketuskulma pienenee, kun viskositeetti pienenee.

Repäisylujuuden mittauksessa mitataan se työ, joka tarvitaan neljän päällekkäisen arkin repäisemiseen alkuvuorosta lähtien. Tähän vaikuttavat kuitupitoisuus, kuidun lujuus ja sitoutumisaste. Repäisylujuudesta lasketaan repäisyindeksi jakamalla repäisylujuus neliömassalla ( $\text{mNm}^2/\text{g}$ ). Jos kuidut ovat heikkoja ja runsaasti sitoutuneita, ne alkavat katkeilla ja repäisylujuus laskee. Kuidut säilyvät ehjinä, jos ne ovat lujuutensa ja pituutensa nähden sopivasti sitoutuneet. Mekaanisen massan kuidut ovat lyhyitä ja lujia, jolloin repäisylujuus paranee.

Paperin ulkonäön määrittävät optiset ominaisuudet. Niiden avulla saadaan käsitys paperin ja siihen kohdistetun valon vuorovaikutuksesta. Materiaalin suuri valonsirontakerroin ilmaisee suurta valonsäteen suunnan muuttumista sekä heijastusta. Valonsirontakerroin on aineen kyky heijastaa valoa takaisin neliömassayksikköä kohti silloin, kun neliömassa on hyvin pieni. Sen yksikkö on neliömassalle käänteinen eli  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Painopapereilla on pintakerroksen vaatimuksena hyvä vaaleus ja opasiteetti. Paperi on yleisesti ottaen vaalea, jos se pystyy heijastamaan takaisin mahdollisimman suuren osan sille langenneesta valosta. Jotta vaaleus voidaan erottaa läpinäkyvyydestä eli opasiteetista, täytyy vaaleuden mittauksessa käyttää niin paksua arkipinoaa, että pinon läpi menevän valon osuus voidaan katsoa nollassa. Opasiteetin voidaan katsoa kuvaavan mustan painatuksen näkymistä yhden valkoisen arkin läpi. Käytettäessä hienompaa täyteainetta tai päällystyspigmenttiä saadaan enemmän valoa heijastavaa ja taittavaa rajapintaa.

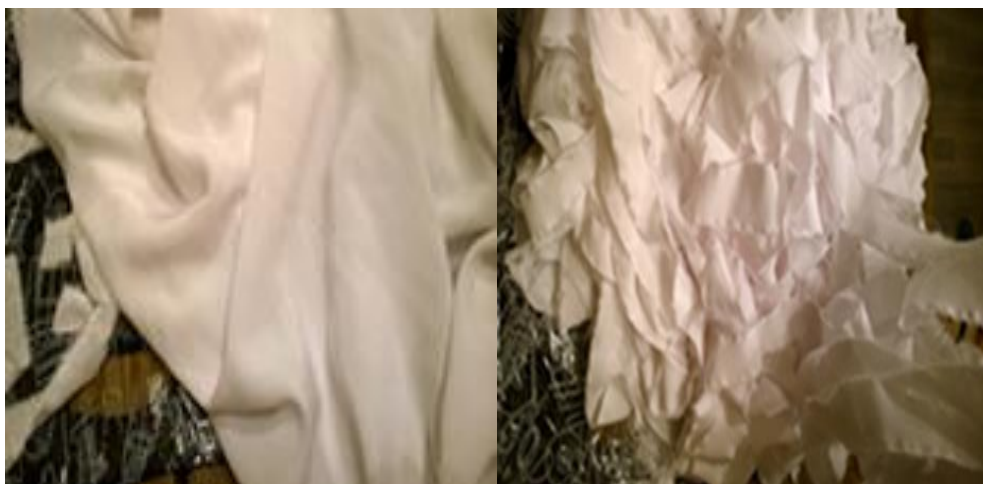
Paperin kiilto ei aina ole tavoite. Sen sijaan painojäljen ja erityisesti monivärikuvan kiilto on. Luettavassa tekstissä paperin kiilto on enemmänkin haitta (Kuva 5). Paperin kiilto on merkki siitä, että pinta on sileä, jolloin sille on mahdollista saada tasainen, korkeakiiltoinen värikerros. Paperin ollessa liian imukykyinen, painoväri imeytyy paperin sisään, jolloin pinnasta ei tule kiiltävää. Paras ja varmin tapa selvittää painojäljen kiilto on tehdä koepainatus ja mitata kiilto suoraan painetusta pinnasta.



**Kuva 5.** Valonsäteen kulku sen kohdatessa paperin pinnan (Hägglom-Ahnger ja Komulainen 2000).

### 1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten kierrätysviskoosi vaikuttaa valmistettavan paperin ominaisuuksiin. Tarkastellaan, millä tavalla kierrätysviskoosista valmistettu paperi poikkeaa neitsytmateriaalista kuten koivusellusta valmistetun paperin ominaisuuksista, ja testataan näiden seosmassasta tehtyä paperia. Tutkitaan, miten erilaisten seosmassojen kuitukoostumus vaikuttaa paperin rakenteeseen ja ominaisuuksiin. Tekstiilien määrä maailmassa ja siitä muodostuva tekstiilijäte (Kuva 6) antavat tavoitetta selvittää selluloosapohjaisten tekstiilien kierrätyksen ja uudelleen käytön mahdollisuuksista. Tässä tutkimuksessa se toteutetaan viskoosin mekaanisella kuidutuksella ja tutkimalla siitä syntyvästä massasta tehdyn paperin ominaisuuksia ja ominaisuuksien vaikutuksia seosmassasta valmistettuihin paperiarkkeihin.



**Kuva 6.** Valkoista viskoosikangasta (Kuva: Katja Stolt).

## 2 Aineisto ja menetelmät

Aineistona tutkimuksessa käytettiin kuivattuja viskoosiarkkeja. Arkkien massa on tehty aikaisemmin mekaanisesti kuidutetusta viskoosikankaasta. Koivusellu on myös kuiva-arkkeina. Näiden kahden materiaalin massoista valmistettiin paperiarkkeja eri seos -suhteilla ja vertailtiin, miten nämä vaikuttavat paperin ominaisuuksiin. Tutkittavia koepisteitä oli viisi (Taulukko 1).

**Taulukko 1.** Tutkittavien massojen seos -suhteet koepisteittäin.

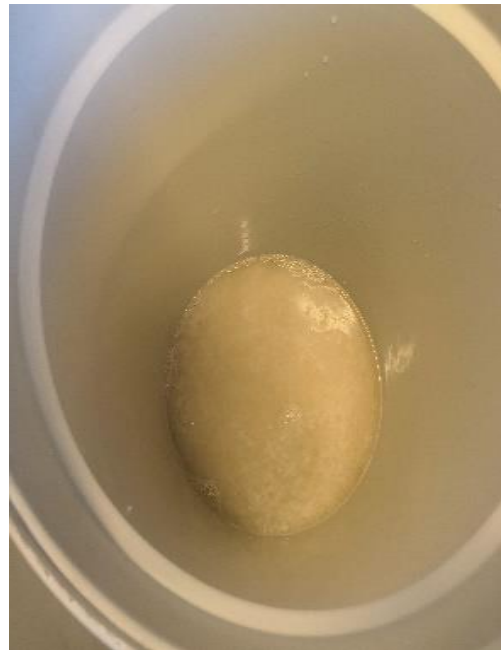
Koepisteet:	1	2	3	4	5
Viskoosi	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Koivusellu	100 %	75 %	50 %	25 %	0 %

Käytetyt menetelmät ovat arkkien valmistus laboratoriossa sekä paperin tärkeimpien ominaisuuksien mittaaminen. Massan ja arkkien valmistuksessa käytetään yleisiä paperinvalmistuksessa käytettyjä standardeja. Tässä tutkimuksessa paperin perusominaisuuksista tutkitaan neliömassaa, paksuutta ja karheutta, optisista ominaisuuksista ISO-vaaleutta, opasiteettia ja valonsirontakerrointa sekä lujuusominaisuuksista repäisylujuutta.



## 2.1 Massojen valmistus

Koivusellu ja viskoosimassa valmistettiin kuiva-arkeista. Arkeista silputtiin 30 g kuiva-ainetta, joka sekoitettiin veteen niin, että yhteistilavuus oli 2 litraa. Sama toistettiin, jolloin sulpun sakeudeksi saatiin 15 g/l. Liotusaika sulpuille oli minimissään neljä tuntia, jonka jälkeen sulppu laitettiin 2 litran erissä hajottimeen (Kuva 7) ja hajotettiin 30 000 kierroksen ajan. Valmiit massasulput laimennettiin arkkien tekoa varten tiheyteen 4 g/l, joka tarkoitti sekä koivusellulle että viskoosille 11 litran vesilisäystä (Kuva 8). Tähän vesimäärään päästiin laskutoimituksella  $15 \text{ g/l} / 4 \text{ g} = 3,75 \text{ l} - 1 \text{ l (jo olemassa oleva vesimäärä)} = 2,75 \text{ l} \times 4 = 11 \text{ l}$ . Valmiiden massojen tilavuus oli näin 15 litraa valmista, tiheydeltään 4 g/l olevaa massaa. Arkin tavoitekuivapaino oli 1,63 g (neliöpaino 60 g/m<sup>2</sup>), jolloin valmista massaa piti olla arkia kohden 0,4075 litraa.



**Kuvat 7 ja 8.** Viskoosin jauhatus ja valmis laimennettu seos (Kuva: Katja Stolt).



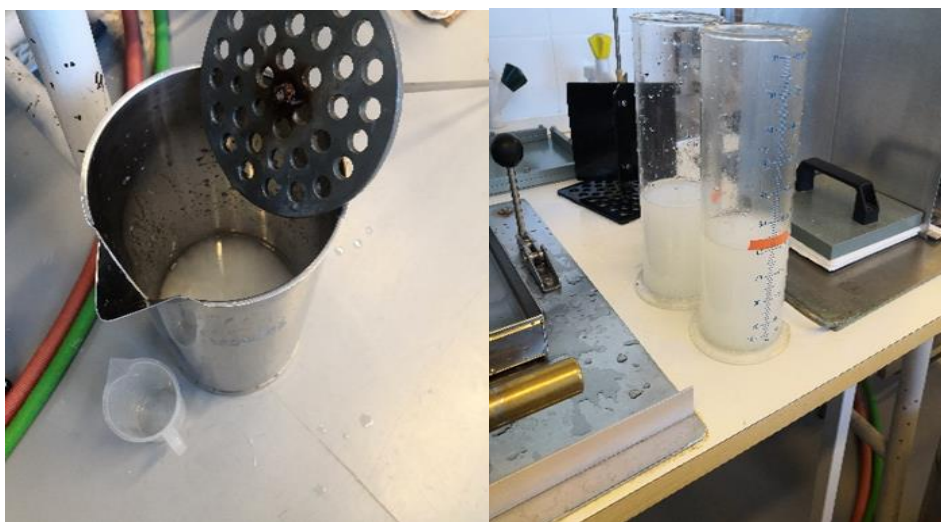
## 2.2 Laboratorioarkkien valmistus

Arkkeja valmistettiin 12 kappaletta jokaista koepistettä kohden. Arkkeja tulee viiteen eri koepisteeseen yhteensä 60 kappaletta. Jokaiselle koepisteen koearkille merkittiin ensimmäiseen imukartonkiin valmiiksi oma tunniste. Merkintä tehtiin oikeaan yläkulmaan. Imukartonki tuli tehdyn koearkin päälle huopautukseen imemään kosteutta. Merkinnät tehtiin tässä kokeessa niin, että arkin järjestysnumero tuli ensin ja sitten koepisteen numero. Esimerkiksi arkki numero kolme ja koepiste neljä merkittiin 3/4.

**Taulukko 2.** Koepisteiden mukaan laskettujen massojen määrä litroina

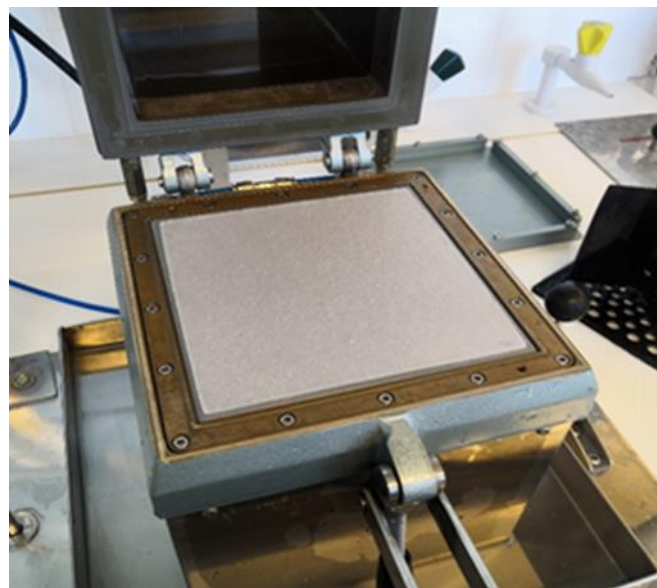
	Koivusellu	Viskoosi	Massan määrä
Koepiste 1	100 %	0 %	5 l
Koepiste 2	75 %	25 %	3,75 l + 1,25 l
Koepiste 3	50 %	50 %	2,5 l + 2,5 l
Koepiste 4	25 %	75 %	1,25 l + 3,75 l
Koepiste 5	0 %	100 %	5 l

Astiasta otettiin hyvän sekoittamisen jälkeen tarvittava määrä koepisteiden mukaan määriteltä massaa erilliseen astiaan (Taulukko 2) (Kuva 9). Valmiin sulpun annostelu arkkimuottiin tapahtui käsin yhden litran mittakannua hyväksi käyttäen. Mittakannussa oli valmiiksi merkittynä 0,4075 litran kohta mittauksen helpottamiseksi, joka on määrä yhdelle arkille (Kuva 10).



**Kuvat 9. ja 10.** Valmiiksi mitatut seokset (Kuvat: Katja Stolt)

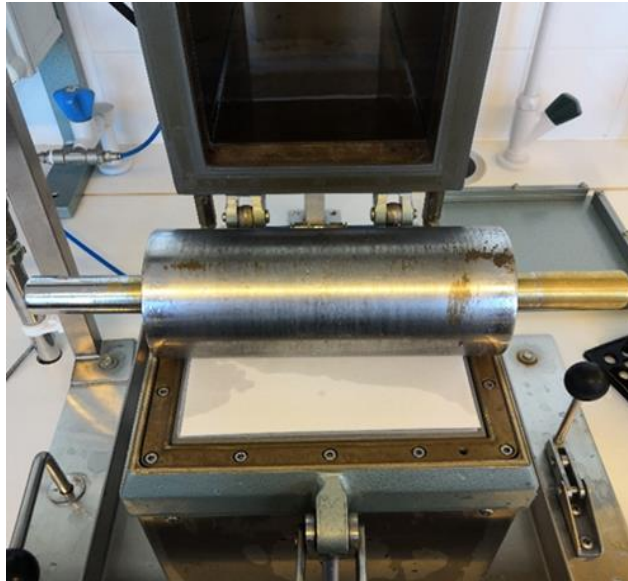
Arkkien valmistusvaiheisiin kuuluvat itse arkin valmistuksen lisäksi huopautus ja irrotus viirasta, märkäpuristus ja kuivatus. Arkkimuotin ja viiran tulee olla puhtaat ja virheettömät. Arkkimuotin pohjaventtiili suljetaan ja vesiventtiili avataan. Valutetaan vettä varovaisesti viiran läpi muotin yläosan ollessa taaksepäin kallistettuna ja huuhdellaan viira huolellisesti. Vesiventtiili ja arkkimuotin yläosa suljetaan. Tämän jälkeen vesiventtiili avataan uudelleen ja annetaan veden nousta noin 5 cm viiran yläpuolelle. Valmiiksi mitattu ja sekoitettu sulppu kaadetaan arkkimuottiin, avataan vesihana ja veden annetaan nousta arkkimuotin sisäpuolella olevaan merkkiin saakka. Arkkimuotissa olevaa sulppua sekoitetaan vesiventtiilin sulkemisen jälkeen reikälevysekoittimella. Sekoitinta liikutetaan ensin viisi kertaa voimakkaasti ylös ja alas. Tämän jälkeen vielä kerran hitaasti ja rauhallisesti niin, että sulpun pinnalle syntyy mahdollisimman vähän aaltoilua. Sekoittaessa ei sekoitin saa nousta sulpun pinnan yläpuolelle eikä koskettaa viiraa ala-asennossaan. Sekoittamisen jälkeen sekoitin nostetaan varovasti pois arkkimuotista, ja 10 sekunnin kuluttua pohjaventtiili avataan nopeasti. Kun vesi on valunut kokonaan viiran läpi, annetaan imun vaikuttaa vielä 10 sekunnin ajan, suljetaan pohjaventtiili ja avataan arkkimuotin yläosa (Kuva 11).



**Kuva 11.** Massan asettuminen viiralle (Kuva: Katja Stolt).

Tehdyn arkin päälle asetetaan tarkasti uusi imukartonki, jossa on merkittynä tunnistenumero, sileä puoli arkkia kohti. Arkki huopautetaan huopautustelalla siten, että tela lasketaan ensin

levyn keskelle (Kuva 12), vieritetään siitä levyn etu- ja takareunaan ja telataan viisi kertaa yli arkin laidasta laitaan sekä edelleen keskelle, josta tela nostetaan pois.



**Kuva 12.** Arkin huopautus (Kuva: Katja Stolt).

Tämän jälkeen paperiarkki nostetaan pois viiralta, lisätään arkin toiselle puolelle puhdas imukartonki sekä molemmille puolille vielä toinen käytetty imukartonki. Tämän jälkeen valmis arkki laitetaan kehikkoon (merkintäpuoli ylöspäin) puristuksiin painon alle. Lisätään aina seuraava valmis arkki päälle. Koepisteiden väliin laitetaan paksumpi levy (Kuva 13).



**Kuva 13.** Valmiit arkit kehikossa (Kuva: Katja Stolt).

Kaikki koepisteiden arkit tehdään samalla tavalla ja kaikkien ollessa valmiina laitetaan osa kehikon pinosta sellaisenaan puristimeen märkäpuristukseen (Kuva 14).

Tehdään yksi märkäpuristus 400kPa +/- 10kPa. Puristusaika on viisi minuuttia.



**Kuva 14.** Märkäpuristus (Kuvat: Katja Stolt).

Tämän jälkeen valmiista arkista poistetaan uloimmat imukartongit. Märkäpuristuksen jälkeen jätetään arkin kummallakin puolella olevat imukartongit arkkeihin kiinni, ja arkit ladotaan kuivausrumpuun, joka lämmitetään 80 C°, kuivaa arkit. (Kuva 15). Arkkien kuivatusaika rummussa on kaksi tuntia.



**Kuva 15.** Arkkien asettaminen kuivausrumpuun (Kuva: Katja Stolt).

Kuivauksen jälkeen kuivausrumpu avataan ja kangas rullataan tukille poistaen samalla arkit kankaan päältä. Arkit irrotetaan varovasti imukartongeista, ja niihin merkitään koodi viirapuolelle. Arkit viedään ilmastoituun tilaan ja ripustetaan kuivumaan siten, että niiden kumpikin pinta pääsee kosketuksiin ilman kanssa. Arkkeja ilmastoidaan vähintään neljä tuntia. (Aaltonen 1986)

### 2.3 Testikappaleiden valmistus ja mittaus

Testattavia arkkeja oli viidestä eri massasta ja mittaukseen valittiin silmämääräisesti tasaisempia arkkeja, yhteensä kymmenen arkkiä koepistettä kohden. Määrittämiä varten arkit leikattiin testikappaleiksi (Kuva 16), joiden mitat olivat  $141 \text{ mm} \times 141 \text{ mm} = 198,81 \text{ cm}^2$  ( $1,2 \text{ g} / 2,0 \text{ dm}^2$ ). Neliömassa ja paksuus määritettiin ensimmäisinä puhtaaksi leikatuista arkeista. Tärkeää oli, että kaikki mittaukset sijoittuivat aina arkkimuottiin nähden samalla tavalla, sillä näin voitiin pienentää arkissa mahdollisesti esiintyvän systemaattisen epätasaisuuden aiheuttamaa hajontaa. Mittausten sijoittuminen samalle kohdalle varmistettiin siten, että koepisteen koodi merkittiin aina arkkiin samalle puolelle ja samalle kohdalle.

Kun ilmanläpäisevyys ja optiset ominaisuudet oli mitattu, leikattiin arkista testikappaleet lujusmäärittämiä varten. Näytteiden tarpeetonta käsittelyä oli vältettävä eikä mittausaluetta saanut kosketella paljain käsin (Aaltonen 1986). Näytearkeista tutkittiin massa, neliömassa ja paksuus, optisista ominaisuuksista ISO-vaaleus, opasiteetti ja valonsirontakerroin sekä lujusominaisuuksista repäisylujuus. Ilmanläpäisevyyttä ei tässä tutkimuksessa voitu mitata, koska arkit olivat liian huokoisia mekaanisen massan puutuessa arkkiseoksista.



**Kuva 16.** Arkkien leikkaus määrämittaam (Kuva: Katja Stolt).



### 2.3.1 Neliömassa

Arkit punnittiin vähintään 0,2 % tarkkuudella (Kuva 17). Arkkien neliömassa lasketaan kaavalla:

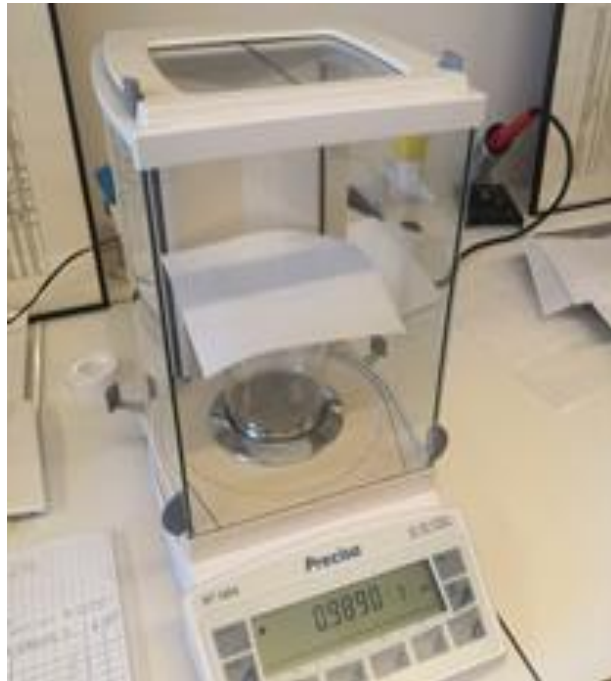
$w = 10000 \text{ m/A}$ , missä

$w$  = testikappaleen neliömassa,  $\text{g/m}^2$

$m$  = testikappaleen massa, g

$A$  = testikappaleen pinta-ala,  $\text{cm}^2$

(Aaltonen 1986)



**Kuva 17.** Arkkien neliömassan punnitus (Kuva: Katja Stolt).

### 2.3.2 Paperin paksuus

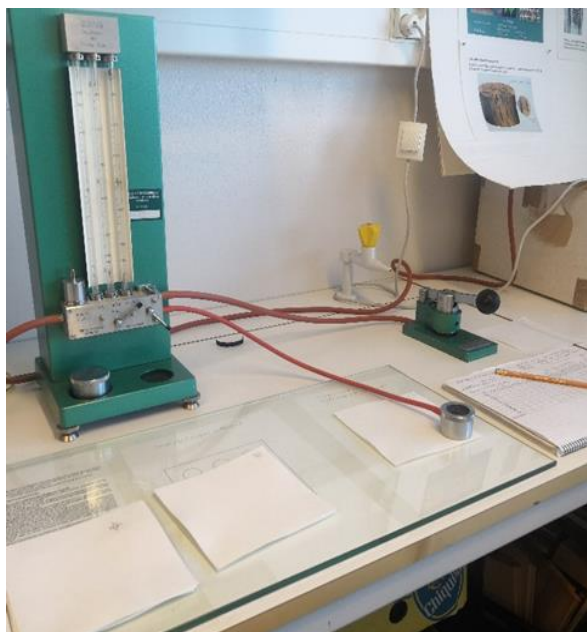
Paperin paksuudet mitattiin L & W-laitteella (Kuva 18). Koepisteen kuuden testiarkin yhteispaksuus mitattiin viidestä eri kohtaa. Näistä lasketaan keskiarvo. Määritykset on tehtävä 2 cm:n etäisyydellä lähimmästä reunasta.



**Kuva 18.** Paksuuden mittaus (Kuva: Katja Stolt).

### 2.3.3 Karheus

Karheusmittaus tehdään Bendtsenin laitteella (Kuva 19), jolla mitataan paperin läpi kulkevan ilmavirran määrää yksiköllä ml/min. Laite mittaa paperin pinnan ja mittalaitteen välistä kulkevan ilman määrän. Arkkit asetetaan mittausta varten lasilevyn päälle. Mittapää asetetaan varovasti arkille liikuttamatta sitä paperia vasten sivusuunnassa. Rotametriputkien liitântähanaa kääntämällä valitaan se rotametreistä, jolla saadaan mitattavalla virtaamalla tarkin tulos. Ilman virtaama luetaan heti mittapään laskemisen jälkeen ratametrin uimurin yläreunan kohdalta. Mittaus toistetaan siirtämällä mittapää uuteen kohtaan paperilla. (Aaltonen 1986) Arkkien huopa- ja viirapuolen karheus mitataan ja ilmoitetaan erikseen. Mittauksia tehdään molemmilta puolilta, samoilta määrättyiltä paikoilta, kymmenen kappaletta. Keskiarvot lasketaan molemmilta puolilta erikseen.



**Kuva 19.** Bendtsenin laite karheuden mittaukseen (Kuva: Katja Stolt).

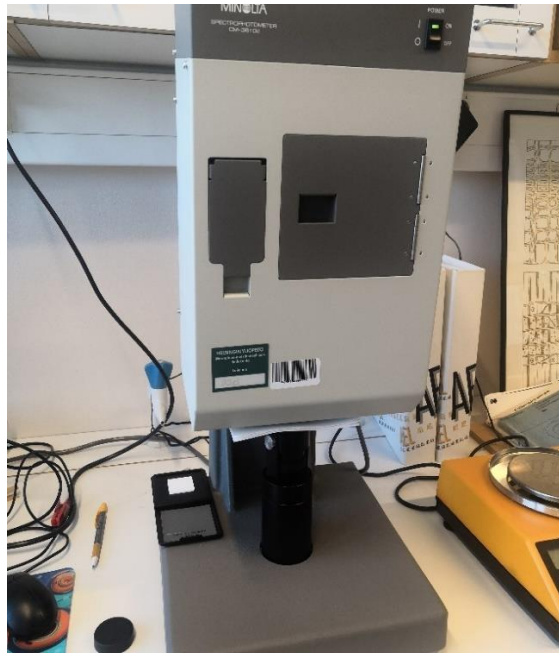
#### 2.3.4 ISO-vaaleus, opasiteetti ja valonsirontakerroin

Minoltan spektrofotometrillä (Kuva 20) määritettiin ISO-vaaleus-%, opasiteetti-% sekä valonsirontakerroin ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ). Testattava arkkinippu mitattiin laittamalla nippu aluslevyn ja näyteaukon väliin. Spektrofotometri antoi nipusta saadun ominaisheijastusluvun. Tämän jälkeen ylin arkki siirretään alimmaiseksi ja mittaus suoritetaan uudelleen. Näin tehtiin, kunnes koko nippu oli käyty lävitse. Testinippu käännettiin ylösalaisin ja sama toistettiin arkkien toiselta puolelta. Arkkien molempien puolien määritysten keskiarvo laskettiin erikseen ja ilmoitettiin ISO-vaaleutena lähimpään 0,5-yksikköön pyöristettynä.

Opasiteetti on läpinäkyvyyden tunnusluku, joka kuvaa paperin kykyä estää sen alla olevalla paperilla olevan painatuksen läpinäkymistä. Mitä korkeampi opasiteetti, sitä vähemmän paperi kuultaa läpi. Opasiteetti kasvaa neliömassan kasvaessa. Mittauksessa käytetään samaa laitetta kuin ISO-vaaleutta mitattaessa ja mittaukset tehdään samalla tavalla. Opasiteetti (%) ilmoitetaan opasiteettien keskiarvona. (Rikala 2014)

Valonsirontakerroin lasketaan ISO-vaaleus-%, ominaisheijastusluvusta, opasiteetin heijastusluvusta ja neliömassasta. Yksikkönä ilmoitetaan  $\text{m}^2/\text{kg}$ .





**Kuva 20.** Minoltan spektrofotometri (Kuva: Katja Stolt).

### 2.3.5 Repäisylujuuden mittaus

Repäisylujuuden määrittämisessä käytettävän paperin koko on 62 mm x 50 mm (Kuva 21). Mittaamiseen käytettiin repäisylujuusmittaria, joka näkyy kuvan 21 taustalla.



**Kuva 21.** Arkkien leikkaus repäisylujuuden mittaamista varten (Kuva: Katja Stolt).

Määrittäminen tehtiin painamalla heilurin pidike alas ja antamalla heilurin heilahtaa vapaasti. Kun heiluri palautui, se pysäytettiin lähellä yläasentoaan käsin sieppaamalla. Osoittimen lukema

luettiin asteikolta 0,5 asteikonosan tarkkuudella, ja heiluri palautetaan yläasentoonsa uutta repäisyä varten. Repäisylujuus lasketaan kaavalla:

$$a = s \times p, \text{ jossa}$$

$$a = \text{repäisylujuus, mN}$$

$$s = \text{asteikon lukemien keskiarvo}$$

$$p = \text{heilurikerroin (p= 19,6)}$$

(Aaltonen 1986)

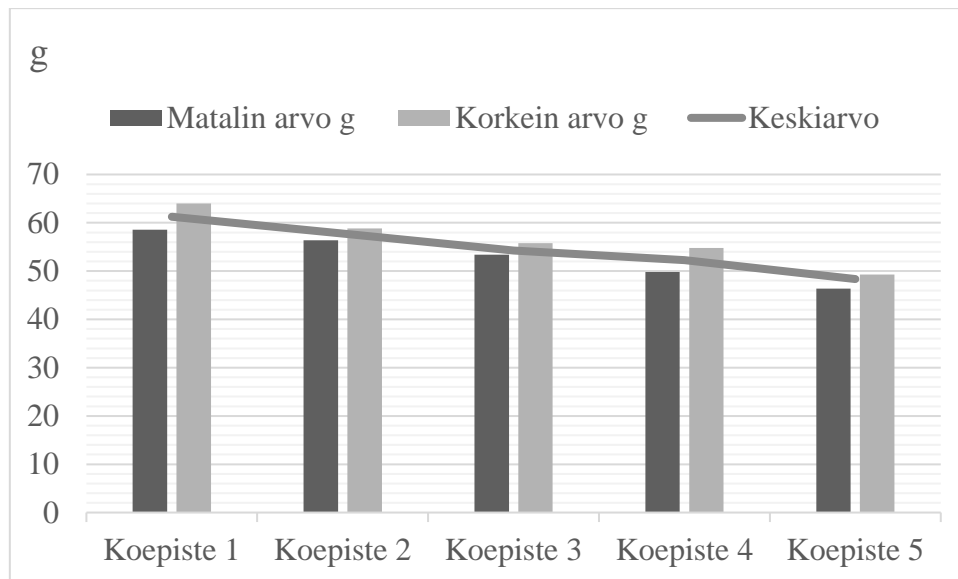
### 3 Kokeellisen osuuden tulokset ja tuloksien tarkastelu

Mittaustuloksissa ilmoitetaan mittauksien sekä laskelmien koepisteittäiset keskiarvot, vaihteluvälit ja hajonnat. Tuloksien yksittäiset mittaukset ovat liitteenä. Koepisteitä oli viisi (Taulukko 3):

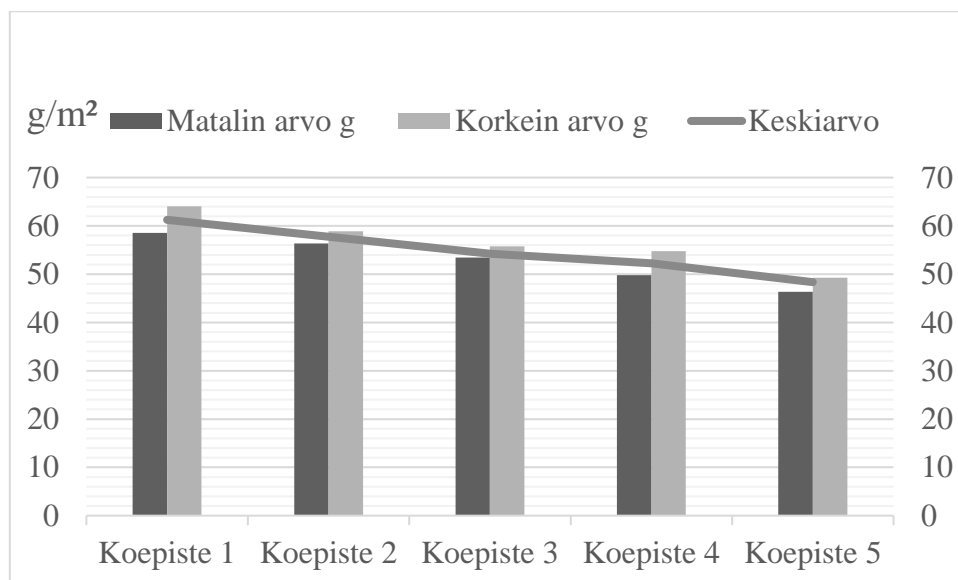
**Taulukko 3.** Tutkittavien massojen seossuhteet koepisteittäin.

Koepisteet:	1	2	3	4	5
Viskoosi	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
Koivusellu	100 %	75 %	50 %	25 %	0 %

Arkin tavoiteneliöpaino on 60 g/m<sup>2</sup>, koko 141 mm x 141 mm = 198,81 cm<sup>2</sup> (1,2 g / 2,0 dm<sup>2</sup>). Koepisteiden sisällä olevien arkki-massojen koko ja neliömassojen tulokset heittelevät yllättävän paljon. Kaikkien koepisteiden välisten massojen keskiarvojen vaihteluvälit olivat keskiarvojen mukaan massan kohdalla 0,95 g - 1,22 g välillä, jolloin hajontaa oli 0,27 g. Neliömassan kohdalla koepisteiden välisten keskiarvojen vaihteluvälit olivat välillä 48,35 g/m<sup>2</sup> - 61,25 g/m<sup>2</sup> ja hajontaa oli 12,9 g/ m<sup>2</sup>. Massan ja neliömassan kohdalla voidaan nähdä, että mitä enemmän seoksessa on viskoosia, sitä kauemmaksi jäädään arkin tavoitepainosta ja neliömassasta (Kuvat 22 ja 23).

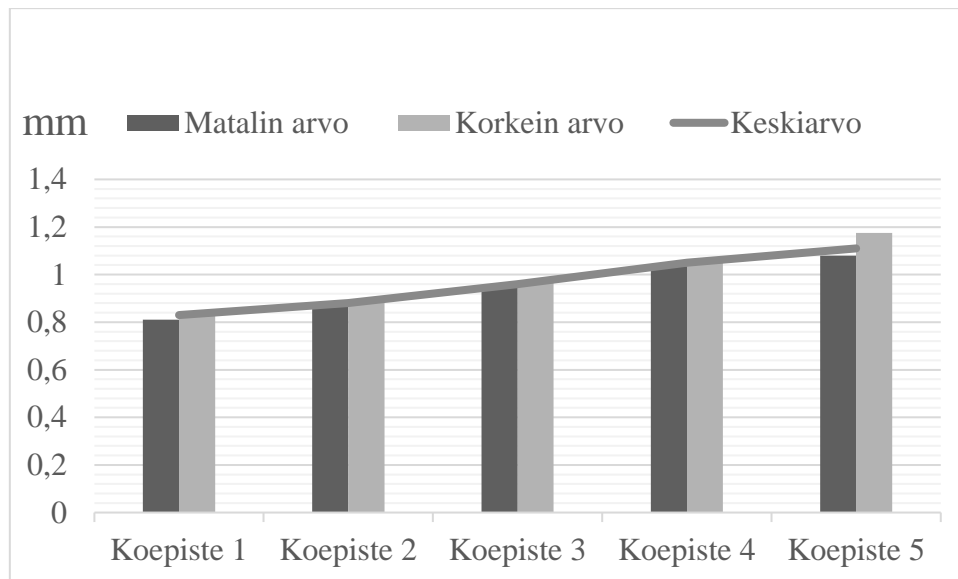


**Kuva 22.** Arkkien massojen vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin.



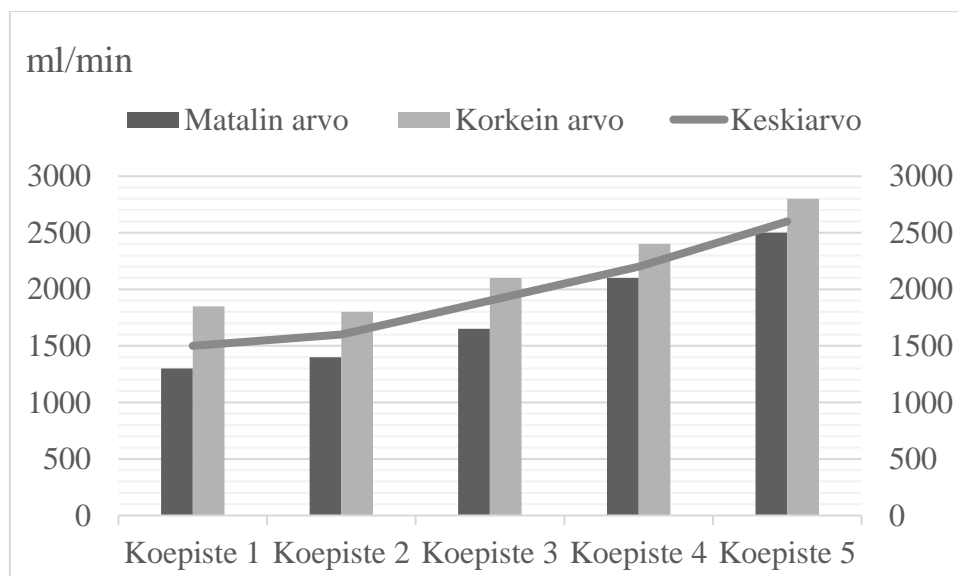
**Kuva 23.** Arkkien neliömassojen vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin.

Paksuutta mitattaessa koepisteiden välisten keskiarvojen vaihteluvälit olivat 0,83 mm - 1,11 mm, ja hajontaa oli 0,28 mm. Paksuutta mitattaessa voi huomata, että viskoosin lisääntyessä arkkien paksuus eli bulkkisuus kasvaa (Kuva 24). Koepisteiden sisällä arkkien paksuuksissa hajontaa ilmeni enemmän viskoosin lisääntyessä.

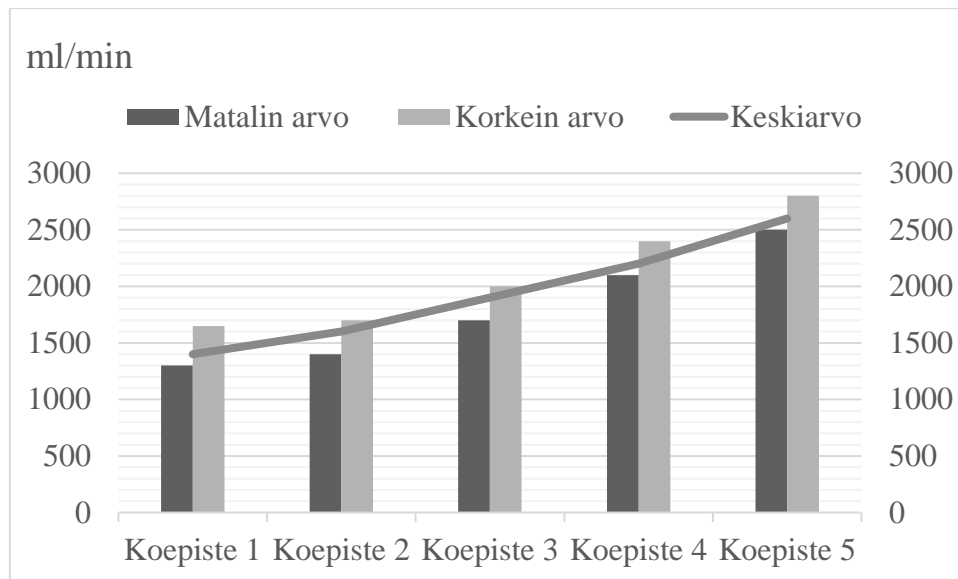


**Kuva 24.** Arkkien paksuuksien vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin.

Arkkien karheusmittauksissa koepisteiden välisten keskiarvojen vaihteluvälit olivat viirapuolella 1500 ml/min–2600 ml/min (Kuva 25) ja huopapuolella 1400 ml/min–2600 ml/min (Kuva 26). Hajontaa koepisteiden välillä on viirapuolella 1100 ml/min ja huopapuolella 1200 ml/min. Kaaviokuvasta voidaan huomata, kuinka viskoosi lisää karheutta: karheus ml/min nousee kohtuullisen voimakkaasti sekä viira- että huopapuolella. Koepisteiden sisällä arkeissa oli mittauksissa jonkin verran vaihtelevuutta.

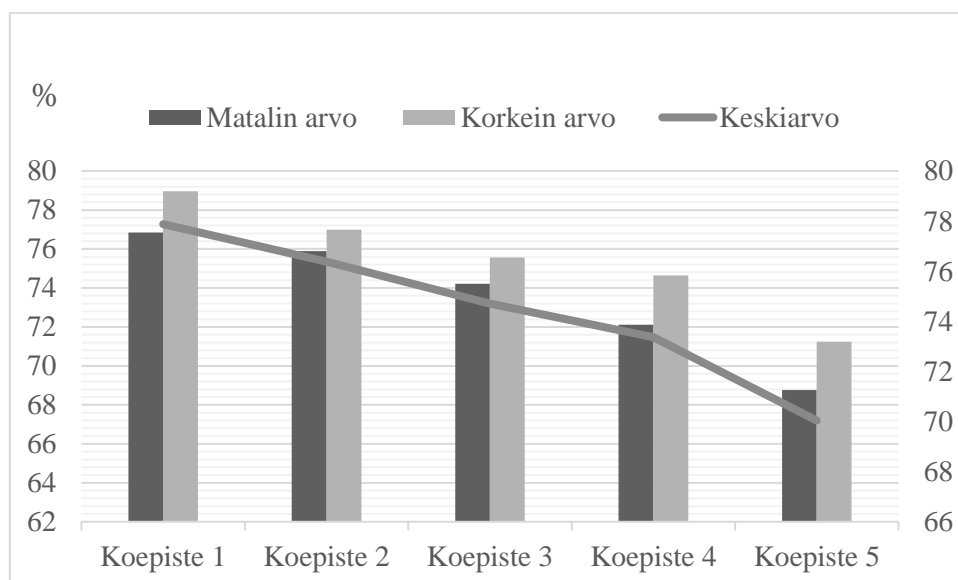


**Kuva 25.** Arkkien karheusmittauksien vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin arkki- en viirapuolelta mitattuna.



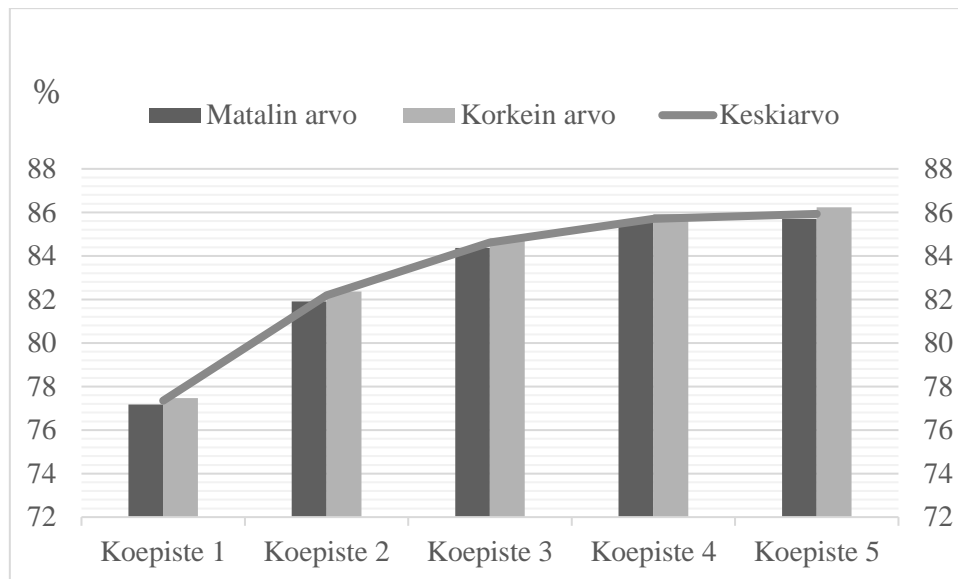
**Kuva 26.** Arkkien karheusmittauksien vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin arkkien huopapuolelta mitattuna.

Opasiteetin eli läpinäkyvyyden vaihteluväli oli koepisteiden välisten keskiarvojen suhteen 70,04 %–77,88 %. Hajontaa oli 7,84 prosenttiyksikköä. Viskoosin lisääntyessä opasiteettiprosentti alkaa systemaattisesti laskea jyrkästi (Kuva 27).



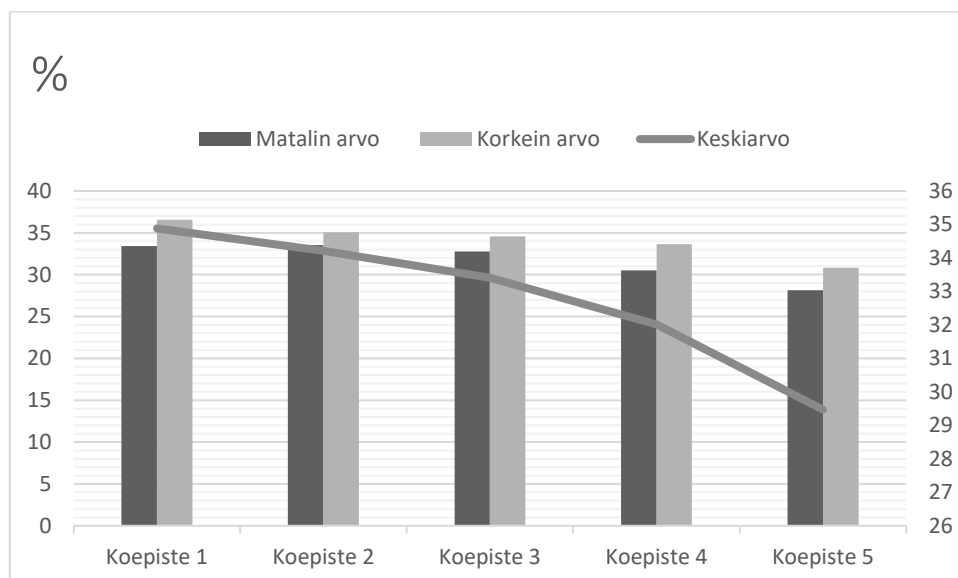
**Kuva 27.** Arkkien opasiteettien vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin.

ISO-vaaleusprosentin vaihteluväli oli koepisteiden keskiarvojen välillä 77,35 %–85,93 % (Kuva 28), jolloin hajonta koepisteiden välillä oli 8,58 prosenttiyksikköä. ISO-vaaleus kasvaa viskoosin lisääntyessä. Koepisteiden sisällä vaihtelua oli hyvin vähän.



**Kuva 28.** Arkkien ISO-vaaleuden vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin.

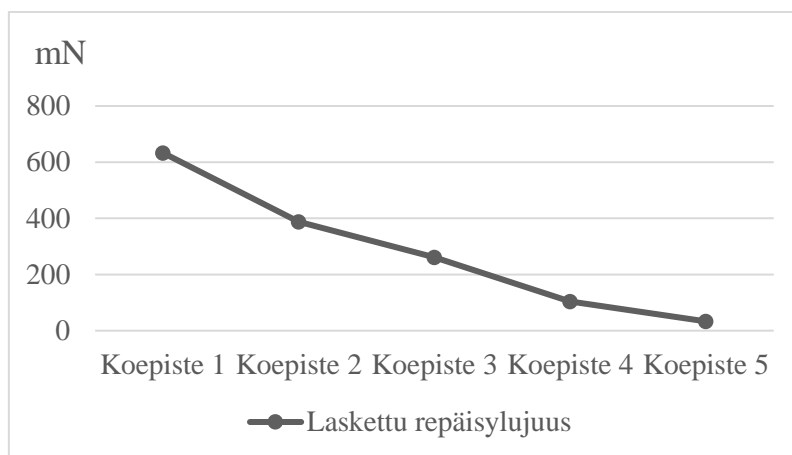
Valonsirontakertoimen vaihtelu oli koepisteiden keskiarvojen välillä 29,47 %–34,88 % (Kuva 29). Hajonta koepisteiden välillä oli 5,41 prosenttiyksikköä. Viskoosin lisääntyessä valon takaisinheijastuminen laskee. Jokaisen koepisteen sisällä oli vaihtelevuutta.



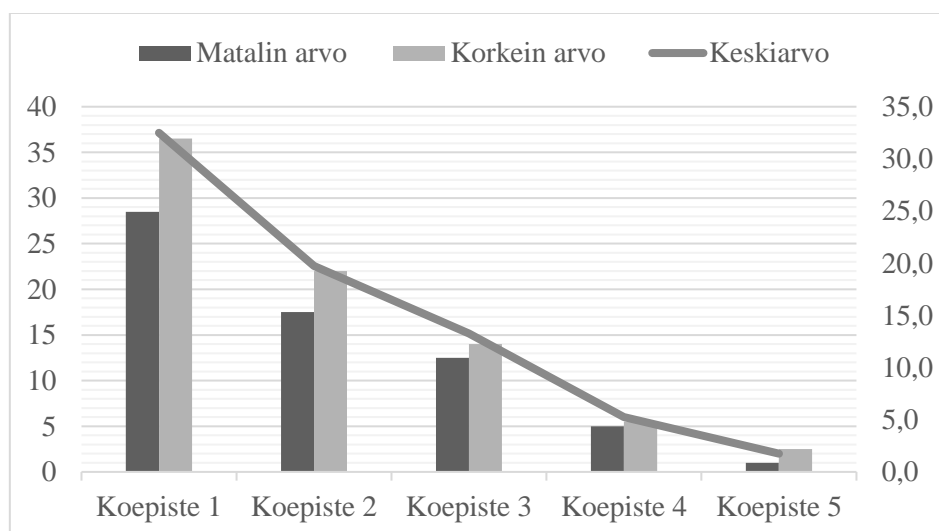
**Kuva 29.** Arkkien valonsirontakertoimen vaihteluvälit ja keskiarvot koepisteittäin.

Repäisylujuuksien vaihtelu oli koepisteiden keskiarvojen välillä luvuilla 33 mN–633 mN (Kuva 30). Hajonta koepisteiden keskiarvojen välillä on 600 mN, mikä laskee 100 prosenttisen viskoosin repäisylujuuden jopa lähelle nollaa. Koepisteiden sisällä oli enemmän vaihtelevuutta niissä mittauksissa, joissa oli enemmän koivusellua. Kuvassa 31, jossa näkyy kaaviona

heiluritestin lukuja, voidaan huomata kuinka jyrkästi mittaustulokset laskevat. Kuidun pituus vaikuttaa erityisesti repäisylujuuteen.



**Kuva 30.** Arkkien repäisylujuuden keskiarvot koepisteittäin.



**Kuva 31.** Asteikon lukemat koepisteittäin repäisylujuutta mitattaessa.

Tässä tutkimuksessa viskoosimassasta ja koivusellusta valmistettiin paperia laboratorio-oloissa samoilla paperinvalmistus -standardeilla. Tavoitteena oli tehdä arkkeja, joiden tavoitekuivapaino on 1,63 g ja neliöpaino 60 g/m<sup>2</sup>. Viskoosin lisääminen massaansa vähensi tavoitekuivapainon saavutettavuutta, josta voidaan päätellä, että viskoosimassan tiheys tulisi olla suurempi, jotta saavutettaisiin laboratorio-oloissa tehtävän paperin tavoitekuivapaino. Etukäteen ei ollut tiedossa, etteikö viskoosia voisi käyttää samalla tiheydellä kuin koivusellua. Viskoosi ja koivuselluarkeista silputtiin 2 x 30 g kuiva-ainetta, mutta viskoosin kohdalla ei tehdyistä paperiarkeista tavoitettu tavoitepainoa. Viskoosikuidulla on tiheyttä 1,52 g/cm<sup>3</sup>, joka tarkoittaa, että viskoosi on kuituna painava (Boncamber 2011). Osa viskoosista oli todennäköisesti jauhatuksessa mennyt erittäin pieneksi, jolloin viskoosia pääsi veden mukana

prosessin läpi, ohi paperinvalmistuksen. Valmistustapa tekee viskoosikuiduista ilmeisen lyhyitä eikä viskoosilla ole myöskään kuitujen välistä sidontakykyä, vain kitkan voimaa (Hiltunen 2020). Mitä lyhyempää kuitu on, sitä hauraampaa tulee siitä tehdystä paperista. Tämän tutkimuksen ulkopuolella (ei laboratorio-oloissa) tekemäni viskoosipaperin painon perusteella voidaan laskea viskoosimassan tarve, jotta saataisiin viiralle ehjä, tarpeeksi massasulppua sisältävä paperiarkki. Tavoitekuivapaino viskoosista tehtyjen arkkien perusteella olisi  $2 \text{ dm}^2 \rightarrow 2 \text{ g}$  ja arkkia kohden  $2,72 \text{ g}$ , mikä tarkoittaisi  $1,09$  gramman lisäystä verrattuna koivuselluarkkiin. Neliöpainon tavoitteen viskoosiarkille tulisi olla  $100 \text{ g/m}^2$ . Tämä viskoosimassan tiheys kestää esimerkiksi jo tulostamisen. Viskoosin määrä arkkien tekoa varten olisi näin  $100 \text{ g/4 l}$ , jolloin sulpun sakeudeksi tulisi  $25 \text{ g/l}$ . Arkkien tekoa varten massa tulisi laimentaa tiheyteen  $6,7 \text{ g/l}$ . Näin ollen päästään  $25 \text{ g/l}$  olevan massan laimennuksen laskutoimitukseen  $(3,73 \text{ l} - 1 \text{ l}) \times 4 = 10,9 \text{ l}$  veden lisäys. Valmiin massan tilavuus on näin  $14,9$  litraa valmista, tiheydeltään  $6,7 \text{ g/l}$  olevaa massaa. Arkin tavoitekuivapaino on  $2,72 \text{ g}$  (neliöpaino  $100 \text{ g/m}^2$ ), jolloin valmista massaa tulisi arkkia kohden olla  $0,4060$  litraa.

#### 4 Johtopäätökset

Tehdyn tutkimuksen perusteella kierrätysviskoosin kuidun käyttäminen paperin valmistukseen ei täytä paperin vaatimuksia valitulla paperinvalmistusmenetelmällä. Massan tiheyden lisääminen kuitenkin antaa viitteitä siitä, että paperia pystyy valmistamaan ja käyttämään. Laboratorio-oloissa tehdyistä arkeista tulee pehmeitä, ja mitä ohuempia arkeista tuli, sitä helpommin ne hajosivat pölyksi (kuitujen asettuminen viiralle vaihteli).

Tutkimuksessa tehtyjen paperiarkkien tulosten perusteella tavoitekuivapainon saavuttamiseen tarvitaan viskoosin sakeuden laskemista varten omat massatiheydet, sillä viskoosi tarvitsee enemmän tiheyttä. Viskoosin suuremmassa tiheydessä mittaustuloksissa olisi päästy todennäköisesti tasaisempiin lukuihin massan ja neliömassan kohdalla. Tuloksissa paksuuden, karheusmittauksien ja ISO-vaaleuden kohdalla viskoosin lisääminen olisi todennäköisesti antanut suurempia paksuus- ja karheuslukuja. Tutkimuksessa valkoisuusluku tasaantui kahden viimeisen koepisteen kohdalla, jolloin ISO-vaaleusprosentti tuskin olisi noussut mainittavasti viskoosin lisääntyessä. Opasiteetin ja valonsirontakertoimen kohdalla koepisteiden välinen lasku olisi yhtä voimakasta. Repäisylujuuden kohdalla viskoosin suurempi tiheys todennäköisesti olisi loiventanut käyrää, eli repäisylujuutta olisi tullut jonkin verran lisää. Viskoosin kuituominaisuuksien vuoksi ei käyrien suuntaa olisi pystytty muuttamaan.



Paksumman massan valmistaminen antaisi vaihtoehtoja eri käyttötarkoituksiin. Tiheydeltään pienemmät, esimerkiksi neliöpainoissa 150–200 g/m<sup>2</sup>, viskoosiarkit ovat kartongin tapaisia, taipuisia, hyvin imukykyisiä ja tulostuksen kestäviä. Käyttökohteita voisivat olla esimerkiksi vessa- ja talouspaperirullien hylsy, suojapaperina pakkauksissa sekä pinnoitettuna kuiva-aineiden säilytysrasioissa.

Suurissa tiheyksissä, joissa päästään neliöpainossa 400 g/m<sup>2</sup>, ovat arkit jo niin paksuja ja jäykkiä, että ne kestävät jonkin verran painoa. Näistä arkeista pystyisi alhaisessa kosteudessa muovaamaan muottien avulla esimerkiksi kananmunankennoja sekä hedelmien kuljetuksessa tarvittavia muotoiltuja välikerroslevyjä. Viskoosi on hyvin imukykyistä, ja loppukuivaus edellä mainittujen massojen kohdalla vie oman aikansa ja energiansa. Kuitu imee nopeasti kosteuden, mutta kuivuu hitaasti. Kuivumiseen tulee näin kiinnittää erityistä huomiota ja huolellisuutta. Viskoosia ei voi myöskään muotoilla lämmön avulla (Boncamper 2011).

Viskoosin uudelleenkuidutuksesta saatavaa märkää massaa kuivattamalla jatkuvassa pyöryksessä ja lämpöpuhalluksessa saadaan talojen eristyksessä käytetyn selluvillan kaltaista pehmeää ainesta. Koostumus on hienojakoista ja täyttäisi siten puhallettaessa pienetkin kolot. Tähän tarkoitukseen käytettynä pitäisi selvittää, olisiko viskoosi tarpeeksi hengittävää, onko kosteuden luovuttaminen ja vastaanottaminen tarpeen mukaista sekä säilyttäisikö se lämmöneristyksensä (viskoosissa sidoksissa oleva ilmamäärä). Viskoosin ominaisuuksiin kuuluu hyvä lämmönjohtokyky sekä se, että viskoosi vapauttaa kosteutta sitoessaan enemmän lämpöä kuin muut kuidut (Boncamper 2011). Viskoosin palosuojaus antaisi eristykselle mielenkiintoisen näkökulman. Tuhohyönteiset eivät myöskään käytä viskoosia ravintonaan (Boncamper 2011). Nykyisin puukuitu- eli selluvilla valmistetaan keräyspaperista, joka on pääasiassa sanomalehtipaperia. Paperi murskataan hienojakoiseksi massaksi ja siihen lisätään boorihappoa ja booraksia yhteensä noin 20 painoprosenttia, jolla hidastetaan paperimurskan palamista ja homehtumista (Eko-Expert 2020). Äänieristyksen voisi ajatella paranevan viskoosia käytettäessä.

Mahdollisia käyttökohteita uudelleenkuidutuksen jälkeen voisivat olla myös erilaiset täytevanut sekä imeytysmatot. Näissä voisi hyödyntää viskoosin pehmeyttä ja imukykyä. Viskoosille ja muille selluloosapohjaisille tekstiilikuiduille löytyy uusia käyttömahdollisuuksia. Todennäköisesti tekstiilit tullaan kuitenkin enimmäkseen kehräämään uudestaan langaksi. Avoinna oleva kysymys kuitenkin on, kuinka monta kertaa kuitua voidaan

kierrättää ja taas kehrtä uudestaan langaksi. Vaihtoehtoiset käyttökohteet kierrätyskuidulle tulevat todennäköisesti ajankohtaiseksi, kun kuitua on jo kierrätetty useamman kerran. Tänä päivänä kaikki käyttökelpoinen tekstiili kerätään yhteen keräyspisteeseen, varsinaista tekstiilijätteen keräystä vasta valmistellaan. Jos halutaan saada selluloosapohjaiset tekstiilijätteet yhteen, tulisi keräys järjestää erilliskeräyksenä.

## 5 Lähteet

Aaltonen, P. (1986). Kuituraaka-aineen ja paperin testausmenetelmiä. Tekijä ja Otakustantamo, Vaasa. s. 64

Biotalous: Liukosellu 10.9.2014. <https://www.biotalous.fi/liukosellu-kangas/>

Boncember, I. (2011). Tekstiili oppi, kuituraaka-aineet. Tammerprint Oy, Tampere. s. 35 ja 225–244

Eko-Expert (2020). Selluvillan valmistus. <https://www.eko-expert.com/puhallusvillan-valmistus>

Halme, M. (2017). Selluloosan entsymaattinen käsittely viskoosin valmistuksessa. Kandidaatin työ 2017, Oulun Yliopisto, Ympäristötekniikka

Hiltunen, E. (2020). Eero Hiltusen luentosarja “Fibre properties and their effects in paper and board making” Helsingin yliopistossa keväällä 2020

Hägglom- Ahnger U. ja Komulainen P. (2000). Paperin ja Kartongin valmistus. Opetushallitus. Hakapaino Oy. Helsinki

Jokelainen, A. (1984). Tekstiilikemian perusteet. Gummerus, Jyväskylä. s.84.

Motiva: Tekstiilit (2018).

[https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/tekstiilit](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/tekstiilit)

Open ilmasto-opas 2020. Ilmastonmuutos tekstiilityön opetuksessa. <https://openilmasto-opas.fi/tekstiilityo/>

Rikala J. 2014, Juha Rikalan luentosarja ”Metsäteollisuuden laboratoriotyöt” Helsingin yliopistossa keväällä 2014

Rosk`n Roll, Asiakaslehti ROSKIS 2020. s.14

Sundqvist, J. (1986). Tekstiiliraaka-aineet 2, tekokuitujen valmistus. 2. painos. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, opintomoniste 72. 1. tekstisivu.

Tekniikka & Talous 13.11.2012 <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/kemia/2012-11-13/Kiinalaisj%C3%A4tti-ryhtyy-valmistamaan-viskoosia-sellusta-suomalaislisenssill%C3%A4> (Luettu 8.5.2016)

Vihreä lanka 15.6.2015. Onko viskoosille ekologista vaihtoehtoa? <https://www.vihrealanka.fi/blogi-eno-vastaa/onko-viskoosille-ekologista-vaihtoehtoa>

Viskoosikuidut, Tekstiiliraaka- aineopin seminaariesitelmät 1979. Raportti 7. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Tekstiili- ja vaatetustekniikan laitos. Tampere 1980. s. 1

VTT: Vastuulliset tekstiilit, <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/vastuulliset-tekstiilit> (luettu 10.10.2020)

Ympäristö.fi 23.4.2015. Rikkinäisille tekstiileille erilliskierrätys, tekstiilit pois jätevoimaloista uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen. [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat\\_ja\\_tilastot/Rikkinaisille\\_tekstiileille\\_erilliskieray\(33234\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Rikkinaisille_tekstiileille_erilliskieray(33234))

## 6 Liitteet

### Mittaustuloksia:

#### Massa ja neliömassa

KOEPISTE 1	g	g/m <sup>2</sup>	KOEPISTE 2	g	g/m <sup>2</sup>
1	1,273	64,03	1	1,17	58,85
2	1,202	60,46	2	1,145	57,59
3	1,224	61,57	3	1,162	58,45
4	1,208	60,76	4	1,162	58,45
5	1,236	62,17	5	1,134	56,84
6	1,164	58,55	6	1,121	56,39
Keskiarvo	1,22	61,25	Keskiarvo	1,149	57,76

KOEPISTE 3	g	g/m <sup>2</sup>	KOEPISTE 4	g	g/m <sup>2</sup>
1	1,077	54,17	1	1,04	52,31
2	1,08	54,32	2	0,99	49,8
3	1,109	55,78	3	1,026	51,61
4	1,077	54,17	4	1,06	53,32
5	1,069	53,77	5	1,027	51,66
6	1,062	53,42	6	1,089	54,78
Keskiarvo	1,08	54,27	Keskiarvo	1,04	52,25

KOEPISTE 5	g	g/m <sup>2</sup>
1	0,965	48,54
2	0,961	48,34
3	0,922	46,38
4	0,943	49,29
5	0,98	49,43
6	0,956	48,09
Keskiarvo	0,95	48,35

## Paksuuden mittaus

KOEPISTE 1		KOEPISTE 2		KOEPISTE 3	
1	0,82	1	0,865	1	0,96
2	0,81	2	0,875	2	0,945
3	0,825	3	0,885	3	0,97
4	0,825	4	0,885	4	0,975
5	0,845	5	0,89	5	0,965
Keskiarvo	0,83	Keskiarvo	0,88	Keskiarvo	0,96

KOEPISTE 4		KOEPISTE 5	
1	1,04	1	1,09
2	1,035	2	1,095
3	1,065	3	1,175
4	1,05	4	1,08
5	1,06	5	1,1
Keskiarvo	1,05	Keskiarvo	1,11

## Karheusmittaus

KOEPISTE 1	Viirapuoli									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1650	1600	1400	1550	1550	1400	1300	1600	1400	1300
2	1500	1650	1400	1600	1600	1500	1500	1500	1550	1500
3	1800	1500	1500	1600	1650	1400	1300	1500	1600	1400
4	1600	1500	1350	1500	1550	1350	1450	1450	1400	1300
5	1700	1600	1550	1700	1850	1500	1700	1700	1650	1600
6	1600	1350	1400	1500	1500	1350	1400	1400	1350	1300

Huopapuoli									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1300	1550	1450	1400	1400	1600	1550	1350	1500	1350
1400	1500	1450	1500	1500	1450	1500	1400	1400	1600
1350	1300	1350	1300	1400	1400	1550	1300	1500	1400
1450	1350	1450	1350	1450	1450	1550	1400	1350	1400
1500	1500	1500	1500	1550	1400	1650	1600	1650	1500
1300	1350	1400	1300	1400	1300	1400	1300	1350	1350

KOEPISTE 2	Viirapuoli									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1800	1600	1600	1750	1550	1600	1550	1700	1400	1650
2	1600	1600	1400	1600	1500	1400	1400	1500	1400	1500
3	1750	1800	1700	1800	1700	1500	1600	1600	1650	1700
4	1600	1500	1500	1600	1550	1400	1450	1500	1450	1450
5	1700	1650	1500	1800	1700	1550	1600	1700	1600	1500
6	1750	1700	1700	1750	1800	1650	1600	1600	1650	1450

Huopapuoli									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1600	1650	1700	1700	1600	1650	1650	1600	1500	1600
1400	1500	1550	1400	1500	1500	1550	1400	1500	1400
1600	1600	1700	1700	1600	1650	1600	1600	1650	1700
1500	1500	1700	1500	1500	1550	1600	1500	1500	1600
1500	1700	1650	1500	1700	1700	1700	1500	1700	1700
1650	1700	1700	1600	1750	1500	1700	1550	1650	1550

KOEPISTE 3	Viirapuoli									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2000	2000	1900	1900	1900	1750	1850	1850	1800	1900
2	1900	1900	1800	1900	1950	1900	1900	1900	1900	1900
3	2100	2000	1900	1900	1900	1900	1850	2000	1900	1800
4	1950	1800	1650	2000	1900	1850	1700	1900	1800	1800
5	1950	2000	1900	2000	1900	1800	1750	2000	1900	1800
6	1950	1900	1900	1900	2000	1900	1900	1950	1800	1900

Huopapuoli									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1950	2000	2000	1800	1900	1800	1900	1850	1800	1900
1900	1900	2000	1900	1900	1950	1900	1900	1900	1800
2000	2000	2100	1850	1900	1950	2000	1900	1950	2000
1800	1900	2000	1750	1900	1900	1900	1700	1800	1800
1950	1900	1950	1900	1900	1950	1900	1850	1900	1900
1900	2000	2000	1900	2000	1900	2000	2000	1900	2000

KOEPISTE 4	Viirapuoli									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2300	2300	2150	2300	2200	2200	2150	2200	2200	2200
2	2400	2300	2200	2200	2300	2250	2100	2200	2150	2200
3	2300	2300	2100	2300	2300	2200	2200	2300	2200	2200
4	2300	2300	2200	2200	2300	2200	2250	2300	2150	2200
5	2300	2200	2200	2100	2200	2250	2200	2300	2200	2200
6	2300	2200	2100	2200	2200	2200	2100	2250	2100	2150

Huopapuoli									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2200	2300	2300	2200	2100	2200	2200	2050	2100	2200
2300	2350	2300	2200	2300	2300	2200	2150	2300	2300
2300	2400	2300	2200	2200	2400	2200	2200	2200	2250
2250	2300	2300	2300	2400	2250	2300	2200	2300	2200
2200	2200	2200	2200	2200	2100	2200	2200	2100	2200
2100	2250	2200	2150	2200	2250	2200	2100	2150	2200

KOEPISTE 5	Viirapuoli									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2700	2600	2600	2500	2700	2700	2650	2600	2650	2800
2	2800	2700	2650	2600	2800	2700	2700	2500	2600	2500
3	2500	2600	2600	2600	2700	2700	2600	2700	2700	2600
4	2700	2700	2600	2600	2700	2650	2650	2550	2550	2500
5	2700	2600	2500	2500	2700	2700	2700	2600	2650	2600
6	2500	2700	2500	2600	2700	2600	2600	2550	2600	2600

Huopapuoli									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2600	2500	2700	2700	2600	2600	2600	2800	2650	2500
2700	2700	2800	2600	2750	2700	2600	2650	2700	2600
2600	2600	2400	2600	2600	2650	2650	2500	2500	2600
2600	2600	2600	2700	2650	2700	2800	2500	2600	2500
2650	2600	2650	2650	2700	2700	2750	2500	2650	2600
2500	2700	2500	2500	2700	2600	2500	2500	2600	2500



**Opasiteetti %**

	KA	MIN.	MAX.	VÄLI
KOEPISTE 1	77,88	76,85	78,97	0,72
KOEPISTE 2	76,38	75,9	76,99	0,42
KOEPISTE 3	74,71	74,21	75,56	0,76
KOEPISTE 4	73,37	72,11	74,65	0,94
KOEPISTE 5	70,04	68,76	71,25	0,84

**Valonsirontakerroin %**

	KA	MIN.	MAX.	VÄLI
KOEPISTE 1	34,88	33,4	36,56	1,07
KOEPISTE 2	34,21	33,55	35,08	0,59
KOEPISTE 3	33,41	32,76	34,57	0,61
KOEPISTE 4	32,01	30,5	33,63	1,16
KOEPISTE 5	29,47	28,14	30,8	0,9

**R457 c/2 + UV, ISO-vaaleus %**

	KA	MIN.	MAX.	VÄLI
KOEPISTE 1	77,35	77,17	77,47	0,09
KOEPISTE 2	82,19	81,91	82,36	0,13
KOEPISTE 3	84,61	84,37	84,81	0,15
KOEPISTE 4	85,71	85,56	85,92	0,12
KOEPISTE 5	85,93	85,71	86,24	0,15

**Repäisylujuus**

	1	2	3	KESKIVARVO	REPÄISYLUJUUS,mN (a=s*p)
KOEPISTE 1	36,5	28,5	32	32,3	633
KOEPISTE 2	22	17,5	20	19,8	388
KOEPISTE 3	12,5	13,5	14	13,3	261
KOEPISTE 4	5,5	5	5,5	5,3	104
KOEPISTE 5	1	1,5	2,5	1,7	33